

## МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПАРОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ПРОПАРОЧНОЙ КАМЕРЕ С АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ НАГРЕВАТЕЛЕМ РОТОРНОГО ТИПА

**Введение.** Одними из наиболее существенных производственных расходов при реализации технологического процесса тепловлажностной обработки бетонных изделий являются расходы на потребляемые энергоресурсы. Готовность строительных изделий, их качество, себестоимость продукции зависят, главным образом, от технологии выполнения процесса тепловой обработки строительных материалов и изделий. Производственный опыт свидетельствует, что процесс тепловой обработки занимает почти 70–80 % времени всего цикла изготовления изделий и является достаточно энергоёмким. На эту стадию приходится около 80 % расходуемой энергии [1, 2]. Последнее время используют различные добавки, которые ускоряют процесс твердения строительных изделий. Использование добавок позволяет изготавливать строительные изделия без тепловлажностной обработки, но остается ряд строительных изделий, которые необходимо обязательно обрабатывать при повышенных температурах.

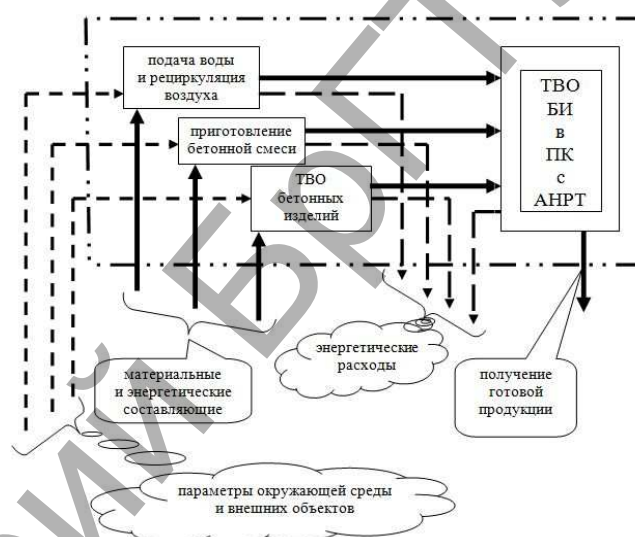
Целью работы является исследование процесса тепловлажностной обработки бетонных изделий в пропарочной камере с аэродинамическим нагревателем роторного типа на основе энергетических и материальных балансов для последующего выбора рациональных режимов технологического процесса с меньшим расходом энергии.

**Основные предположения, начальные и граничные условия.** Бетонные изделия относятся к капиллярно-пористым материалам. Процессы теплообмена, происходящие в них, детально изложены в ряде известных работ [1–3]. На формирование бетонных изделий влияют следующие факторы [2]: теплообмен между изделием и паровоздушной смесью, формами изделий; тепловыделение при гидратации цемента.

В работах [4–8] нами были рассмотрены существующие технологии тепловлажностной обработки строительных изделий и материалов. Конструктивное исполнение существующего оборудования требует больших затрат на вспомогательное оборудование (котельная и коммуникации). Принимая во внимание большие расходы на вспомогательное оборудование для обеспечения тепловой энергией пропарочной камеры, целесообразно заменить котельную и коммуникации на источник парообразования непосредственно в пропарочной камере. Как альтернатива рассмотренным технологиям, авторами была принята технология аэродинамического нагрева [6, 8], согласно которой, основное теплогенерирующее оборудование – аэродинамический нагреватель роторного типа осуществляет непрерывную рециркуляцию воздушного потока, и в результате аэродинамических потерь в нем происходит постоянный нагрев воздушной среды в замкнутом пространстве теплоизолированной рабочей камеры. На рисунке представлена структурная схема технологического процесса тепловлажностной обработки бетонных изделий в пропарочной камере с аэродинамическим нагревателем роторного типа. Паровоздушная среда образуется в рабочем пространстве пропарочной камеры в результате аэродинамического нагрева воздуха, находящегося в объеме рабочей камеры, и распыленных в ней капель воды, которая дозированно подается через форсунки. Поток горячего влажного воздуха при рециркуляции передает тепло корпусу камеры, формам изделий и равномерно разогревает изделия.

Паровоздушная среда может нагревать или охлаждать поверхность форм и бетонных изделий, в зависимости от разницы температур между паровоздушной средой камеры и соприкасающимися поверхностями [2]. Таким образом, происходит взаимодействие между паровоздушной средой и формами изделий.

Свободная влага, которая содержится в бетоне, испаряется с поверхности бетонных изделий или конденсируется на их открытой поверхности, в зависимости от параметров паровоздушной среды и температуры открытой поверхности изделий (взаимодействие между паровоздушной средой и изделиями) [3, 9].



ТВО – тепловлажностная обработка; БИ – бетонные изделия; ПК – пропарочная камера; АНРТ – аэродинамический нагреватель роторного типа; материальные и энергетические составляющие – масса и температура, соответственно, воды, воздуха, составляющих бетонной смеси, свежеформованных бетонных изделий; энергетические расходы – теплопотери, тепловые потоки технологического процесса (нагревание бетонной смеси, форм изделий, камеры)

**Рис. 1.** Структурная схема технологического процесса тепловлажностной обработки бетонных изделий в пропарочной камере с аэродинамическим нагревателем роторного типа

На основании принятых предположений запишем начальные и граничные условия для периодов технологического процесса тепловлажностной обработки бетонных изделий в пропарочной камере с использованием аэродинамического нагрева (таблица 1).

### Материальный баланс паровоздушной смеси.

С началом ТВО давление в пропарочной камере  $p_k$  будет равно атмосферному и будет состоять из суммы парциального давления водяного пара  $p_n$  и парциального давления воздуха  $p_e$ , то есть давлению паровоздушной среды  $p_{пес}$ :

$$p_k = p_{пес} = p_n + p_e. \quad (1)$$

Согласно уравнению Клапейрона-Менделеева [9], определим величины парциальных давлений для воздуха и водяного пара:

$$p_n = \frac{m_n R_n (t^k + 273)}{V_{пес}}, \quad (2)$$

$$p_e = \frac{m_e R_e (t^k + 273)}{V_{пес}}, \quad (3)$$

Колесник Елена Петровна, аспирант кафедры теплогазоснабжения Винницкого национального технического университета, Украина.

Коц Иван Васильевич, к.т.н., профессор кафедры теплогазоснабжения Винницкого национального технического университета, Украина. Украина, 21021, г. Винница, Хмельницкое шоссе, 95.

Таблица 1. Начальные и граничные условия для периодов ТП ТВО в ПК с АНРТ

ПЕРИОДЫ ТП ТВО	ПАРАМЕТР	НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ	ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ
Подъем температуры (процесс изохорный)	температура	$t^K = t_{\text{пом}} = 20^\circ\text{C}$	$20^\circ\text{C} < t^K < 80^\circ\text{C}$
	влажность	$\varphi^K = \varphi_{\text{пом}} = 40-60\%$	$40-60\% < \varphi^K < 90-100\%$
	давление	$p^K = p_{\text{пом}} = 10^5\text{ Па}$	$10^5\text{ Па} < p^K < p_{\text{пес}}$
	время ТВО	$\tau = 0\text{ час}$	$0\text{ год} < \tau < 3\text{ час}$
Выдержка (процесс изотермический)	температура	$t^K = 80^\circ\text{C}$	$t^K = 80^\circ\text{C}$
	влажность	$\varphi^K = \varphi_{\text{пом}} = 90-100\%$	$\varphi^K = 90-100\%$
	давление	$p^K = p_{\text{пес}},\text{ Па}$	$p^K = p_{\text{пес}}$
	время ТВО	$\tau = 3\text{ час}$	$3\text{ час} < \tau < 9\text{ час}$
Охлаждение (процесс изохорный)	температура	$t^K = 80^\circ\text{C}$	$80^\circ\text{C} > t^K > 40^\circ\text{C}$
	влажность	$\varphi^K = \varphi_{\text{пом}} = 90-100\%$	$90-100\% > \varphi^K \geq 40-60\%$
	давление	$p^K = p_{\text{пес}},\text{ Па}$	$p^K \geq p_{\text{пом}}$
	время ТВО	$\tau = 9\text{ час}$	$9\text{ год} > \tau \geq 12\text{ час}$

где  $m_n$ ,  $m_e$  – масса, соответственно, пара и воздуха в рабочем пространстве пропарочной камеры, кг;  $V_{\text{пес}}$  – объем рабочего пространства пропарочной камеры,  $\text{м}^3$ ;  $t^K$  – температура паровоздушной смеси в рабочем пространстве пропарочной камеры,  $^\circ\text{C}$ ;  $R_n$ ,  $R_e$  – газовая постоянная, соответственно, пара и воздуха, Дж/кг К.

Учитывая принятые начальные и граничные условия, определяем давление паровоздушной смеси в рабочем пространстве пропарочной камеры при изохорном процессе, согласно [9]:

$$\frac{dp_{\text{пес}}}{d\tau} = \frac{dp_e}{d\tau} + \frac{dp_n}{d\tau}, \quad (4)$$

$$\frac{dp_n}{d\tau} = \frac{p_{\text{пом}}^n (t^K + 273)}{t_{\text{пом}} + 273}, \quad (5)$$

$$\frac{dp_e}{d\tau} = \frac{p_{\text{пом}}^e (t^K + 273)}{t_{\text{пом}} + 273}, \quad (6)$$

где  $p_{\text{пом}}^e$ ,  $p_{\text{пом}}^n$  – парциальное давление, соответственно, сухого воздуха и водяного пара в воздухе помещения, Па.

$$\frac{dp_{\text{пес}}}{d\tau} = \frac{(p_{\text{пом}}^e + p_{\text{пом}}^n)(t^K + 273)}{t_{\text{пом}} + 273}. \quad (7)$$

Массу водяного пара и сухого воздуха в данном объеме паровоздушной смеси, согласно уравнению Клапейрона-Менделеева, найдем из следующих зависимостей:

$$\frac{dm_n}{d\tau} = \frac{p_n V_{\text{пес}}}{R_n (t^K + 273)}, \quad (8)$$

$$\frac{dm_e}{d\tau} = \frac{p_e V_{\text{пес}}}{R_e (t^K + 273)}. \quad (9)$$

Пар, попадая на более холодную поверхность, конденсируется. На поверхности образуется пленка конденсата толщиной  $\delta$ , поверхность при этом нагревается, и ее температура увеличивается до величины температуры паровоздушной среды. Запишем, в общем виде, уравнение материального баланса паровоздушной смеси в пропарочной камере с аэродинамическим нагревателем роторного типа:

$$\frac{dm_{\text{пес}}}{d\tau} = \frac{dm_e}{d\tau} + \frac{dm_n}{d\tau}, \quad (10)$$

где  $m_{\text{пес}}$  – масса паровоздушной смеси в рабочем пространстве пропарочной камеры, кг.

Подставив 8 и 9 в 10, и после превращения уравнение материального баланса будет иметь следующий вид:

$$\frac{dm_{\text{пес}}}{d\tau} = \frac{p_{\text{пес}} V_{\text{пес}}}{(R_e + R_n)(t^K + 273)}. \quad (11)$$

Решение системы уравнений (1–11) предоставляет возможность определения величин давления и влажности паровоздушной смеси, а также позволит, при поддержке автоматизированной системы управления, обеспечить достижение необходимой влажности паровоздушной смеси, соответствующей к технологическому регламенту, на каждом этапе технологического процесса тепловлажностной обработки бетонных изделий в пропарочной камере с использованием аэродинамического нагревателя роторного типа.

**Заключение.** Рассмотрены основные закономерности технологического процесса тепловлажностной обработки бетонных изделий в пропарочной камере с аэродинамическим нагревателем роторного типа. На основании принятых начальных и граничных условий для периодов технологического процесса тепловлажностной обработки составлен материальный баланс паровоздушной смеси в пропарочной камере. Согласно предложенной математической модели, можно исследовать соотношения и взаимосвязи между основными параметрами и характеристиками паровоздушной смеси и осуществить выбор наиболее рационального режима работы теплогенерирующего оборудования, который будет обеспечивать поддержание оптимальной влажности в соответствии с технологическим регламентом, на каждом этапе технологического процесса тепловлажностной обработки бетонных изделий. Использование предложенной методики позволит осуществлять выбор рациональных параметров и характеристик пропарочных камер с аэродинамическим нагревателем роторного типа для тепловлажностной обработки бетонных изделий при их проектировании.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Романюк, В.Н. Основы эффективного энергоиспользования на производственных предприятиях дорожной отрасли / В.Н. Романюк, В.Н. Радкевич, Я.Н. Ковалев. – Минск, 2001. – 287 с.
2. Электронная библиотека: [Общие вопросы бетона](http://www.hydrobeton.ru) [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://www.hydrobeton.ru>.
3. Баженов, Ю.М. Технология бетона [Электронный ресурс]: [Учеб. пособие для технол. спец. строит. вузов. 2-е изд., перераб.] / Ю.М. Баженов – М.: Высш. шк., 1987. – 415 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/65050/>.
4. Сліпенька, О.П. Енергозбереження при автоклавному обробленні будівельних виробів // Вісник ВПІ – 2007. – № 4. – С. 24–27.
5. Колісник, О.П. Перспективи використання автоклавної обробки будівельних виробів // Науково-технічний збірник "Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві" – 2007. – № 4. – С. 75–78.

6. Колісник, О.П. Процеси тепломасобіну при теплової обробці бетонних виробів / О.П. Колісник // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2008. – № 38 – С. 82–87.
7. Пропарювальна камера: патент 40453. МПК C04B 40/00 / О.П. Колісник, І.В. Коц– № u200812905; заявлено 05.11.2008; опубл. 10.04.2009, бюл. № 7.
8. Спосіб тепловологісної обробки будівельних виробів: патент 40455. МПК C04B 40/00 / О.П. Колісник, І.В. Коц– № u200812911; заявлено 05.11.2008; опубл. 10.04.2009, бюл. № 7.
9. Марьямов, Н.Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона / Н.Б. Марьямов – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.

Материал поступил в редакцию 15.02.13

#### KOLESNIK E.P., KOTS I.V. Material balance vapor mixture in steaming chamber with aerodynamic of heater rotary type

Basic conformities to law of technological process of heat and moisture treatment of concrete wares are considered in steam thoroughly chamber with the aerodynamic heater of ring-type. Initial and border conditions are accepted for the periods of technological process of heat and moisture treatment material balance of heat and moisture mixture is made in steam thoroughly chamber.

УДК 504(476.7)

Волчек А.А., Бульская И.В.

### СТОК С УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ И ЕГО ОЧИСТКА

**Введение.** Город представляет собой особую в экологическом отношении среду, отличную от естественной природной среды, характерной для данного региона. Широко известными проблемами урбанизированных территорий являются тепловое загрязнение, загрязнение воздуха, проблема утилизации твердых отходов и коммунальных сточных вод. В последнее время все больше исследователей обращает внимание также на проблему поверхностного стока, формируемого на урбанизированных территориях. Во-первых, современный город представляет собой среду со значительным процентом непроницаемых для атмосферной влаги покрытий (покрытия дорог и тротуаров, стоянок автотранспорта и промышленных территорий, крыш зданий). Это приводит к тому, что объем поверхностного стока, формируемого на территории города, значительно превышает объем поверхностного стока, формируемого в естественных ландшафтах, где существенная часть влаги впитывается в почву, а также расходуется растениями. Измененный гидрологический режим города может производить в 5 раз больше поверхностного стока, чем, например, эквивалентная территория, занятая лесом [1]. Во-вторых, поверхностный сток на урбанизированной территории в процессе своего формирования накапливает значительное количество примесей. Поверхностный сток с урбанизированной территории по загрязненности сравним с коммунальным стоком [2].

Источники попадания загрязнений в поверхностный сток можно разделить на две группы:

- точечные источники – это, например, перегрузка систем канализации, нелегальные выбросы («врезки») в систему дренажной ливневой канализации городов, либо стоки с территорий со специфическим назначением (таких, как территории промышленных предприятий);
- неточечные источники – мусор, опавшие цветы и листья, взвешенные вещества (продукты износа автомобильных шин и дорожных покрытий, эрозий почвы, твердые частицы промышленных выбросов), бензин и масла с поверхностей дорог, частички несгоревшего топлива, синтетические поверхностно-активные вещества, нутриенты, железо, тяжелые металлы, соли, являющиеся компонентом противогололедных смесей в зимний период, бактерии [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

Поверхностный сток с урбанизированных территорий может наносить существенный вред окружающей среде: вызывать подтопление и разливы, заиливание, бактериальное загрязнение, повышение температуры и понижение содержания кислорода в принимающем водотоке, истощение подземных вод, ухудшение качества питьевой воды [11].

**Выбор методов очистки.** Формирование поверхностного стока на городской территории представляет собой сложный процесс, подверженный влиянию таких факторов, как назначение и степень хозяйственного освоения территории, ее загрязненность, интенсивность и продолжительность осадков, продолжительность предшествующего сухого периода, нормы расхода воды при мойке дорож-

ных покрытий. На состав поверхностного стока также оказывают влияние загрязненность атмосферы, наличие и численность промышленных предприятий и строительных площадок, интенсивность движения транспорта, тип застройки на данной территории и функциональное назначение застройки, режим уборки территории, особенности местной гидрографии и климата [7, 8, 9, 10].

Эффективное управление поверхностным стоком, образующимся на урбанизированных территориях, возможно только при учете всех особенностей его формирования на данной территории и должно быть направлено как на предотвращение подтоплений и перегрузок дренажной системы, так и на предотвращение попадания в окружающую среду загрязняющих веществ, т.е. на уменьшение объема стока и увеличение емкости дренажной сети, с одной стороны, и на снижение загрязненности стока с другой [12, 13]. Нерациональное применение существующих методов очистки поверхностного стока может оказывать негативное влияние на окружающую среду, а именно: препятствовать перемещению водной фауны; уменьшать количество взвешенных веществ и, таким образом, вызывать недостаточную седиментацию ниже по течению в принимающем водотоке и, как следствие, водную эрозию; ингибировать водных обитателей и прибрежную растительность; увеличивать температуру ниже по течению и уменьшать содержания растворенного кислорода [14].

В странах Европы и США используются два принципа предотвращения загрязнений, вызванных поверхностным стоком с урбанизированных территорий, – контроль в месте образования и контроль в месте сброса стока. Контроль в месте образования предусматривает комплекс мер по сокращению объема образующегося поверхностного стока либо предотвращение его образования. Контроль в месте сброса стока представляет собой разработку разнообразных очистных сооружений, располагаемых на выходе из коллектора дренажной ливневой канализации, проточного или задерживающего типа, призванных обеспечить снижение уровня загрязненности стока до приемлемых величин перед сбросом в принимающий водоем. Уровни очистки поверхностного стока с урбанизированных территорий подчиняются той же иерархии, что и уровни очистки канализационного стока (выделяют первичный, вторичный и третичный уровни очистки) [1, 15].

С учетом сложности процесса формирования поверхностного стока и большого числа факторов, оказывающих влияние на его состав, выбор оптимального метода очистки должен предусматривать решение ряда вопросов: 1) возможность достижения требуемого уровня очистки данным методом и эффективности метода для достижения заданного уровня очистки; 2) стоимость данного метода и стоимость эксплуатации и технического обслуживания требуемых сооружений; 3) особенности водосборной территории, учет имеющихся ограничений (наличия свободных территорий, доступность для служб технического обслуживания и т.п.); 5) социальные вопросы (эстетика, безопасность); 6) возможности смягчить другие по-

Бульская Инна Валерьевна, аспирант кафедры химии Брестского государственного университета имени А.С. Пушкина.

Беларусь, БрГУ им. А.С. Пушкина, 224016, г. Брест, бульвар Космонавтов, 21.